

正曲げを受ける合成桁の曲げ耐力に及ぼすウェブ幅厚比の影響

Influence of web slenderness on flexural strength of composite girders under positive bending

○江頭 克礎*

中村 聖三**

高橋 和雄***

呉 慶雄****

Katsuki Egashira

Shozo Nakamura

Kazuo Takahashi

Qingxiong Wu

ABSTRACT In this study, the influence of web slenderness on the flexural strength of steel-concrete composite sections is investigated. Finite element analyses are performed on 15 sections in order to calculate the web buckling moment. The initial imperfection, i.e. initial deflection and residual stress, is considered in the analyses. Three kinds of steel materials, SS400, SM490 and SM570, are used for the studied models to evaluate their influence on the critical slenderness of the web. Consequently, the web slenderness that can reach fully-plastic moment of the section is formulated.

Keywords: 合成構造, 曲げ耐力, ウェブの幅厚比, 塑性設計, コンパクト断面

Composite structures, Flexural strength, Web slenderness, Plastic design, Compact section

1. はじめに

我が国の道路橋は、周知のごとく道路橋示方書・同解説¹⁾ (以下、道示) に基づき設計される。現在の道示では、大地震に対する耐震設計を除き、設計法として鋼材の降伏点を基準とする許容応力度法が採用されているため、道示により設計された橋梁は、定められた条件下で弾性応答することが求められていることになる。したがって、鋼橋の設計においては、鋼材の弾性域のみが利用されていることとなり、鋼材の特徴である塑性域での伸び性能やひずみ硬化といった性質は活用されていない。一方、アメリカ²⁾ やヨーロッパ³⁾、カナダ⁴⁾等諸外国の設計基準には部分安全係数設計法の書式を用いた限界状態設計法が採用されており、圧縮域における座屈現象が生じないような断面においては、その曲げ抵抗として全塑性モーメントをとる場合もある。また、弾性解析で得られた連続桁の中間支点における負曲げモーメントを、降伏後のモーメントの再配分を考慮し、10%まで低減することを認める規定²⁾ もある。いずれも、終局限界状態においては塑性状態になることを許容

していることになる。

近年わが国においては、厳しい経済状況を反映して公共事業の見直しなどが進められているが、橋梁に関しても構造的な工夫や新材料の開発によるコスト削減が試みられている。鋼橋に関して言えば、従来の橋梁用鋼材より優れた性能を有する鋼材、いわゆる高性能鋼材が開発されており、それらを積極的に活用しようという取り組みが行われている⁵⁾。また、設計基準も従来の仕様規定型から、構造物が保有すべき性能を明示し、その性能が満足されているか否かを照査する、いわゆる性能照査型へ移行しようという傾向にある。性能照査型設計法の導入により新技術の採用が容易になり、ひいては橋梁のコストダウンにつながることが期待されている。

以上のような背景を踏まえ、近年、鋼材の塑性域を考慮した耐荷力および変形性能の関係について検討したいくつかの研究が報告されている。例えば、低降伏比鋼や高張力鋼を用いた梁の塑性変形性能に関する実験的または解析的な研究として、神應ら⁶⁾、鈴木ら^{7,8)}の研究がある。これらは主に

*工修 長崎大学大学院 生産科学研究科 学生 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

**博(工) 長崎大学 工学部社会開発工学科 助教授 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

***工博 長崎大学 工学部社会開発工学科 教授 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

****Ph.D 長崎大学 工学部社会開発工学科 助手 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

高性能鋼材の非弾性設計法への適用やその特性の有効活用を念頭に置いた検討であり、降伏比やフランジの幅厚比等の違いが耐荷力または変形性能などに及ぼす影響について検討している。

著者らも、鋼-コンクリート合成断面を対象に、全塑性モーメントを基準としたわが国独自のコンパクト断面設計法を確立することを目的とし、これまでに鋼材の塑性域での応力-ひずみ関係の影響を考慮した曲げ耐力の検討を行ってきた⁹⁾。

本研究は、断面の曲げ耐力として全塑性モーメントを期待できる条件の確立を目指した研究の第一段階として、ウェブの座屈による曲げ耐力の低下のみに着目した検討を行い、SS400, SM490, SM570の3種の鋼材に対するウェブの限界幅厚比を明らかにするものである。

2. 解析概要

2.1 解析モデルの諸元

解析に用いたモデルは、SS400, SM490, SM570のそれぞれに対して表-1に示したとおりである。これらはAASHTO LRFD²⁾の規定に基づき、鋼材

の降伏強度から算定されるウェブ圧縮領域の限界幅厚比を参考に設定している。なお、ここでの限界幅厚比とは、断面が全塑性モーメントに到達できる限界の幅厚比のことである。

断面諸元については、圧縮領域のウェブ高を十分確保できるようにウェブ全高を3000mmと設定し、それ以外の諸元については現実的な値として図-

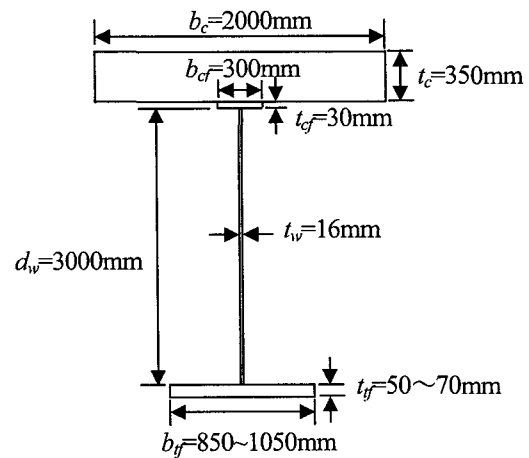


図-1 解析対象断面

表-1 解析断面諸元

使用 鋼材	コンクリート 設計基準強度 $f_c'(\text{N/mm}^2)$	モデル名	圧縮領域 ウェブの 幅厚比 $\left(\frac{d_{wc}}{t_w}\right)$	ウェブの 応力勾配 $\varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1}$	全塑性状態 における ウェブの 圧縮領域高 $d_{wc}(\text{mm})$	ウェブ 厚 (mm)	下フラン ジ厚(mm)	下フラン ジ幅(mm)
SS400	30	BT45	44.94	4.17	719	16	70	850
SS400	30	BT52	51.81	3.62	829	16	70	900
SS400	30	BT59	58.63	3.20	938	16	70	950
SS400	30	BT66	65.50	2.86	1048	16	70	1000
SS400	30	BT72	72.31	2.59	1157	16	70	1050
SM490	40	BT38	37.75	5.05	604	16	65	850
SM490	40	BT44	44.13	4.32	706	16	65	900
SM490	40	BT50	50.44	3.78	807	16	65	950
SM490	40	BT57	56.81	3.36	909	16	65	1000
SM490	40	BT63	63.13	3.02	1010	16	65	1050
SM570	50	BT32	32.25	5.91	516	16	50	850
SM570	50	BT37	37.13	5.13	594	16	50	900
SM570	50	BT42	42.00	4.54	672	16	50	950
SM570	50	BT47	46.88	4.07	750	16	50	1000
SM570	50	BT52	51.75	3.68	828	16	50	1050

1 に示す通りとする。ただし、下フランジ幅は圧縮領域のウェブの幅厚比が所定の値となるよう変化させる。また、鋼種ごとにコンクリートの強度および下フランジ厚を変化させているが、これはどの鋼種でも同程度の大きさのモデルで解析しようとした場合、所定の幅厚比を満たすためには強度が大きいほど下フランジ幅が小さくなるため、それを調節するためである。

2.2 解析方法

解析は汎用有限要素解析ソフトウェア MARC¹⁰⁾ を用いて行うものとする。解析モデルは図-2 に示すように合成桁の一部分を取り出したものとする。取り出す橋軸方向の長さは垂直補剛材間隔とし、ウェブのアスペクト比(縦横比)が 1.0 となるよう、ウェブ高と等しくする。ただし、計算時間を短縮するため対称性を考慮した 1/2 モデルとする。拘束条件は図-2 に示す通りとする。また、コンクリート床版部にはソリッド要素(No.7)、鋼桁部にはシェル要素(No.75)を用い、コンクリート床版と上フランジは完全に一体化して変形するものとする。すなわち、両者は節点を共有している。解析モデルの要素分割数は、コンクリート床版において高さ方向に 5 分割、幅方向に 16 分割、ウェブにおいて 18 分割、フランジは 10 分割している。橋軸方向はいずれも 10 分割である。また、初期不整として残留応力および初期たわみを考慮する。解析においては、平面を保持しながら変形するように条件を与えた断面の塑性中立軸の位置に回転を徐々に与えていくことにより、曲げモーメントと回転角との関係を算定するとともに、曲げ耐力を求める。

2.3 材料特性

コンクリートおよび鋼材の材料特性を以下に示すが、解析を実施する際には入力制約から、曲線で表されている部分を多直線近似している。

2.3.1 コンクリート

応力 - ひずみ関係として、コンクリート標準示方書¹¹⁾ で規定されている式(1)を用いる。その概略図を図-3 に示す。ポアソン比は 0.17 とする。

$$\sigma'_c = 0.85f'_c \left(\frac{\epsilon'_c}{0.002} \right) \left(2 - \frac{\epsilon'_c}{0.002} \right), \quad \epsilon'_c \leq 0.002 \quad (1)$$

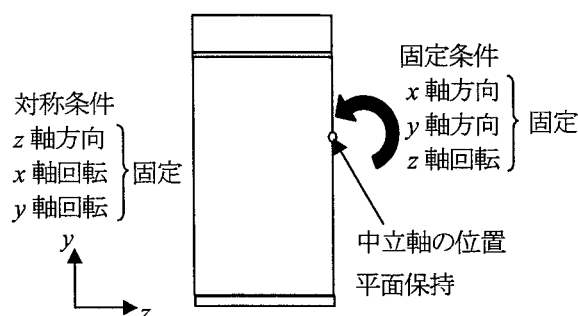


図-2 解析条件

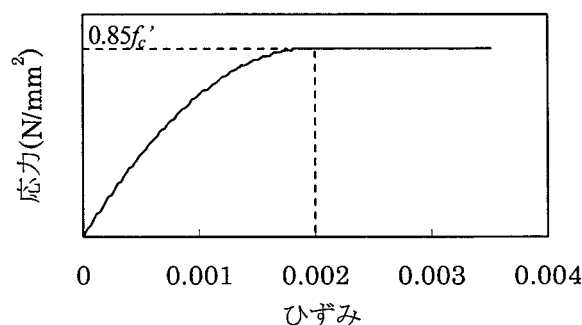
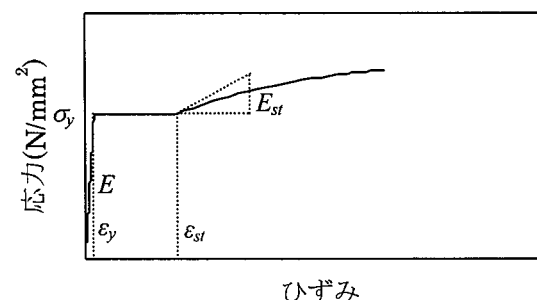


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係



ひずみ

図-4 鋼の応力-ひずみ関係

表-2 鋼材のパラメータ

	ξ	ϵ_{st}/ϵ_y	E/E_{st}
SS400	0.06	10	40
SM490	0.06	7	30
SM570	0.02	3	100

2.3.2 鋼材

応力 - ひずみ関係には、式(2)で表される土木学会鋼構造新技術小委員会で提案されたモデル¹²⁾を用いる。その概略図を図-4 に示す。また、用いる鋼材は SS400, SM490, SM570 の 3 種類である。鋼材の応力 - ひずみ関係を決定するそれぞれのパラメータを表-2 に示す。

$$\begin{aligned}\sigma_s &= E\varepsilon_s & \varepsilon_s &\leq \varepsilon_y \\ \sigma_s &= \sigma_y & \varepsilon_y &\leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{st}\end{aligned}$$

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_y} = \frac{1}{\xi} \frac{E_{st}}{E} \left[1 - \exp \left\{ -\xi \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} - \frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_y} \right) \right\} \right] + 1 \quad \varepsilon_s \geq \varepsilon_{st} \quad (2)$$

なお、ヤング率は200000N/mm²，ポアソン比は0.3とする。

2.4 初期不整

2.4.1 初期たわみ

初期たわみとしては，道路橋示方書の部材精度の規定を参考に，最大値を腹板高の1/250（図-5参照）とする正弦波を仮定する。したがって，モデルのウェブにおける初期たわみは，以下の式で求められる。

$$\delta_G = \frac{d_w}{250} \sin\left(\frac{\pi}{d_w} y\right) \cos\left(\frac{\pi}{d_w} z\right) \quad (3)$$

ここで， d_w ：ウェブ高である。

2.4.2 残留応力

残留応力は，フランジとウェブの溶接部近傍に引張残留応力として降伏応力 σ_y を与え，その他の部分では自己平衡条件が成立するような分布形状を仮定する。解析では，図-6に示すような分布の値を用いている。

3. 解析結果と考察

3.1 曲げ耐力の定義

本研究では，その目的からウェブが座屈したときに断面に作用しているモーメントを断面の曲げ耐力と考える。そのため，図-7のモーメントと回転角の関係の一例に示しているように，モーメントがピークに達し，ウェブが座屈したと考えられる点のモーメント M_{cr} を曲げ耐力とする。また，図-7のようにピークが明らかでない場合は，図-8に示すようにモーメントとウェブ面外方向変位の関係から，面外方向変位の増加率が明らかに大きくなる点を読み取り，座屈発生荷重とする。このようにして求めた座屈発生荷重とウェブの幅厚比の関係を調べることで，断面の曲げ耐力を全塑性モーメントと考えることのできるウェブの幅厚比の限界を明らかにしていく。

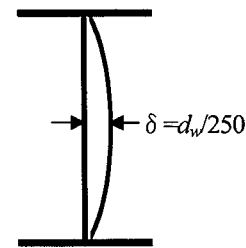


図-5 初期たわみの考慮法

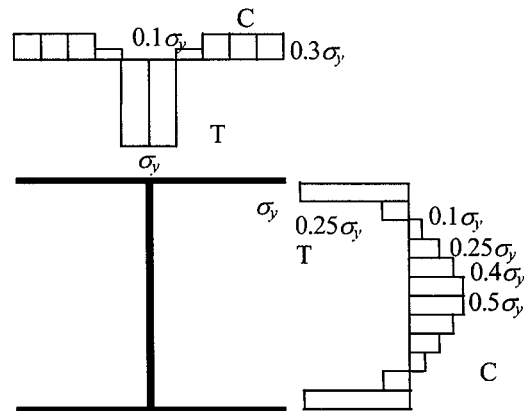


図-6 残留応力分布

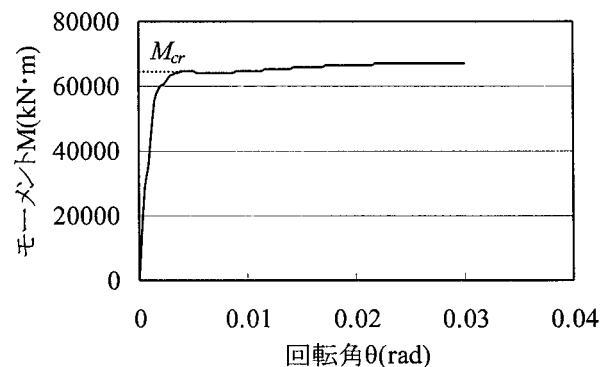


図-7 モーメントと回転角の関係の一例

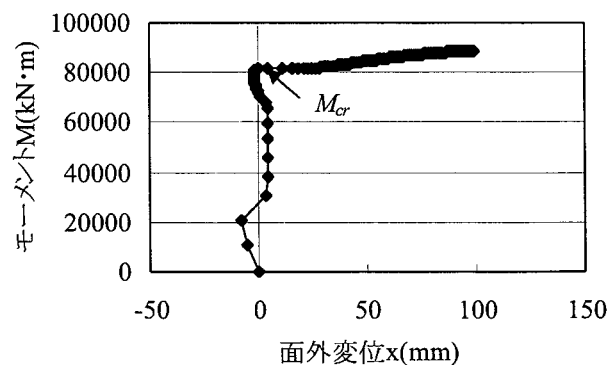


図-8 モーメントと面外変位の関係の一例

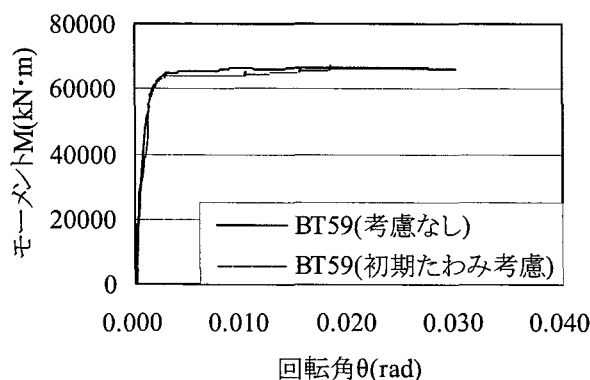


図 - 9 初期たわみの影響

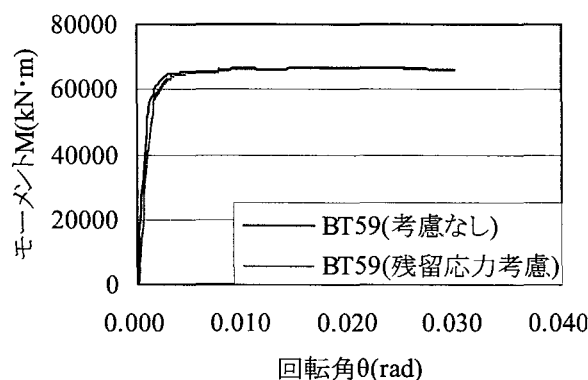


図 - 10 残留応力の影響

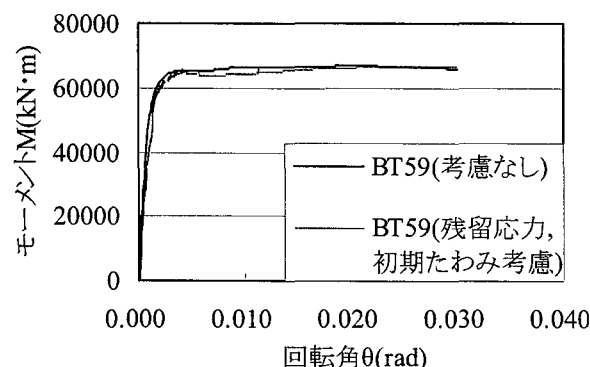


図 - 11 同時に考慮した場合の影響

3.2 初期不整の影響

3.2.1 初期たわみの影響

本解析では、初期たわみを式(3)で示される図 - 5 のように考慮しているが、ここでは仮定した初期たわみが座屈による曲げ耐力の低下に及ぼす影響について検討する。

解析結果の比較を図 - 9 に示す。解析結果を見てみると、初期たわみを考慮した場合もしない場合も、座屈するまでほぼ同じ挙動を取っており、座屈後若干初期たわみを考慮した方が耐力の低下が見られることがわかる。ウェブの座屈強度という面に関しては初期たわみの影響は小さいものと考えられる。

3.2.2 残留応力の影響

本解析では、残留応力を図 - 6 に示すように考慮しているが、ここでは残留応力が座屈による曲げ耐力の低下に及ぼす影響について検討する。

解析結果の比較を図 - 10 に示す。残留応力を考慮した場合は、考慮しなかった場合と比較して若干回転角に対する曲げモーメントの上昇が緩やかになっているものの、最終的な曲げ強度という点に関してはほぼ変わらないことがわかる。

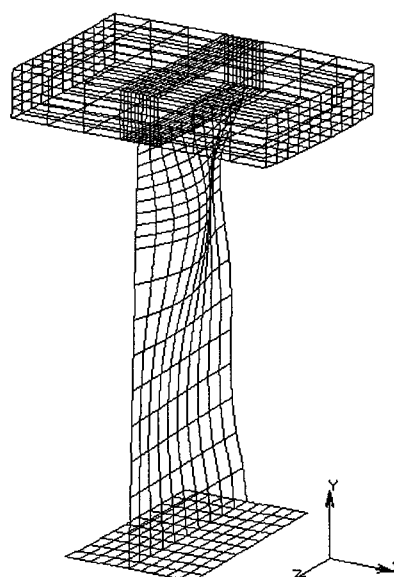


図 - 12 座屈開始時の変形形状

3.2.3 同時に考慮した場合の影響

次に、初期不整として初期たわみおよび残留応力の両方考慮した場合の座屈による曲げ耐力の低下に及ぼす影響について検討する。

図 - 11 に解析結果の比較を示すが、初期不整を考慮しなかった場合と比較して若干回転角に対する曲げモーメントの上昇が緩やかになって、座屈後の耐力の低下が見られる。これは、初期たわみと残留応力それぞれの影響をそのまま受け継いだ形となっており、初期不整を考慮しても座屈強度にそれほど変化は無いことが分かる。

3.3 変形モード

図 - 12 には、SM490 を用いたモデル BT50 において、座屈したと考えられる時の変形形状を 15.8

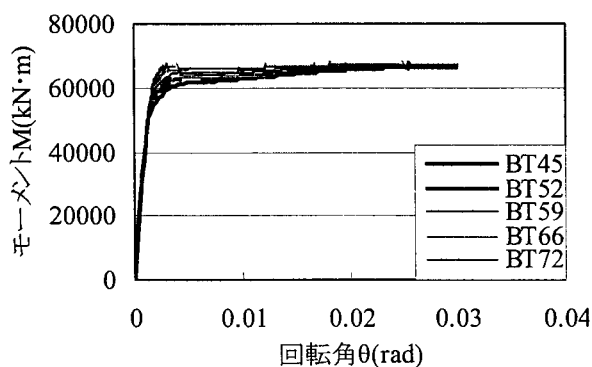


図 - 13 SS400 の解析結果

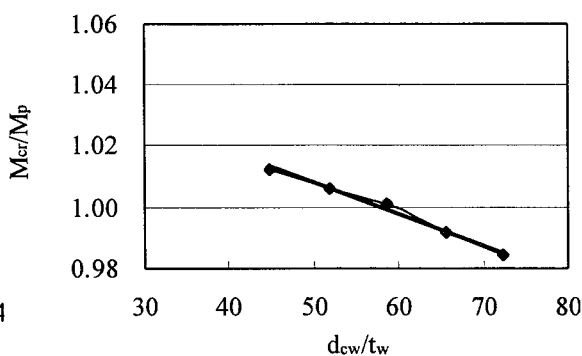


図 - 14 曲げ耐力とウェブの幅厚比の関係 (SS400)

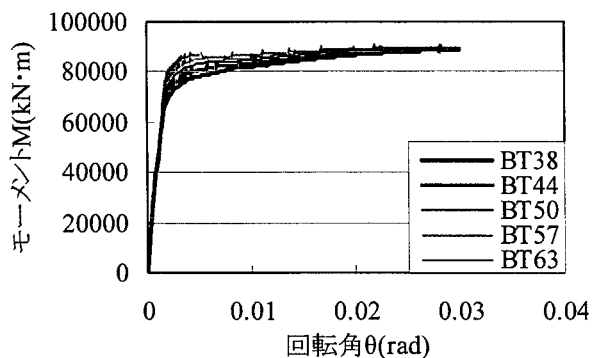


図 - 15 SM490 の解析結果

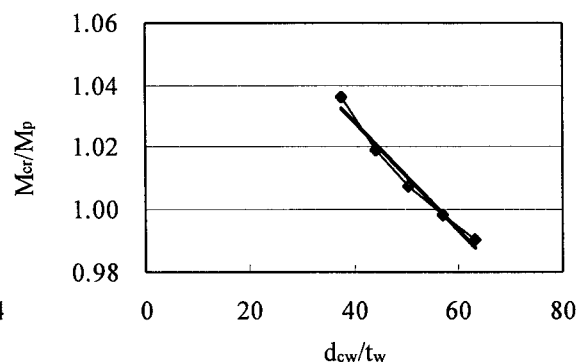


図 - 16 曲げ耐力とウェブの幅厚比の関係 (SM490)

倍に拡大して示している。図を見るとウェブのみが面外方向に変形していることがわかる。また、中央部分と端部に近いところでは、変位の方向が逆になっており波打つような変形形状となっている。こうした変形モードは鋼種やモデルによらず、ほぼ同一であった。

3.4 鋼種によるウェブ限界幅厚比の変化

3.4.1 SS400 の限界幅厚比

図 - 13 に、有限要素解析から得られた SS400 を用いた場合のモーメントと回転角の関係を示す。図からわかるように、一度ピークに達した後ウェブが座屈し強度の上昇が鈍化もしくは若干減少するものの、その後斜張力場を形成し徐々に強度が上昇していく傾向にある。

次に、曲げ耐力と幅厚比との関係を図 - 14 に示す。縦軸は、解析より得られた曲げ耐力を全塑性モーメントで除して無次元化したものである。図 - 14 からわかるように、曲げ耐力と幅厚比の関係はほぼ直線で表される。そのため、両者の関係を直線近似し、限界幅厚比（曲げ耐力が全塑性モーメントとみなせるウェブの幅厚比の限界値）を求

めると、その値は 59.5 となる。

3.4.2 SM490 の限界幅厚比

図 - 15 に、有限要素解析から得られた SM490 を用いた場合のモーメントと回転角の関係を示す。SS400 ほど明確なピークが表れないものの、ウェブの座屈直後は強度の上昇が鈍化し、その後 SS400 と同様に斜張力場を形成し徐々に強度が上昇していく傾向にある。

次に、曲げ耐力と幅厚比との関係を図 - 16 に示す。図 - 16 からわかるように、この場合も同様に曲げ耐力と幅厚比の関係はほぼ直線で表される。同図のように直線近似し、限界幅厚比を求めると値は 55.3 となった。

3.4.3 SM570 の限界幅厚比

最後に SM570 について見ていく。図 - 17 に、SM570 を用いた場合の解析結果を示す。図からわかるように、SM490 と同様幅厚比が小さいほうでは、明確なピークが表れないものの、ウェブの座屈直後は強度の上昇は鈍化し、その後他の鋼材と同様に斜張力場を形成し徐々に強度が上昇していく傾向にある。

次に、曲げ耐力と幅厚比との関係を図 - 18 に示

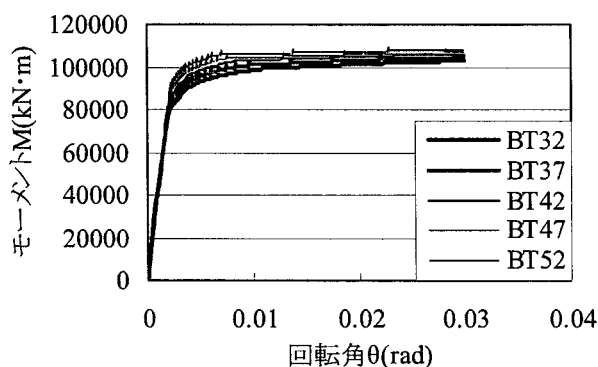


図 - 17 SM570 の解析結果

す。この場合、幅厚比の上昇とともに徐々に傾きが大きくなる傾向にあるが、直線近似してもそれほど大きな誤差はないと考え図のように直線近似すると、限界幅厚比の値は48.2となった。これらのことから、鋼材の強度が上昇するにつれ、ウェブの限界幅厚比は減少することがわかる。

3.5 限界幅厚比の算定式

以上のように、解析から各鋼種におけるウェブの限界幅厚比が得られたが、これらを式(4)に示すAASHTO²⁾のコンパクト断面とみなすことのできるウェブの幅厚比の条件にならない、(ヤング係数/鋼材の降伏強度)の1/2乗でまとめ定式化すると式(5)~(7)が得られる。

・AASHTOにおけるウェブの幅厚比の条件

$$\frac{2d_{wc}}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad (4)$$

・今回算定したウェブの限界幅厚比

$$\text{SS400 の場合} \quad \frac{d_{wc}}{t_w} = 2.04 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad (5)$$

$$\text{SM490 の場合} \quad \frac{d_{wc}}{t_w} = 2.19 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad (6)$$

$$\text{SM570 の場合} \quad \frac{d_{wc}}{t_w} = 2.29 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad (7)$$

鋼種によって若干係数は違うものの、差異は15%程度でありそれほど大きいものではない。そこで、設計における簡便性を考慮し、すべての鋼材に対して安全側となるよう、係数を2.0とした

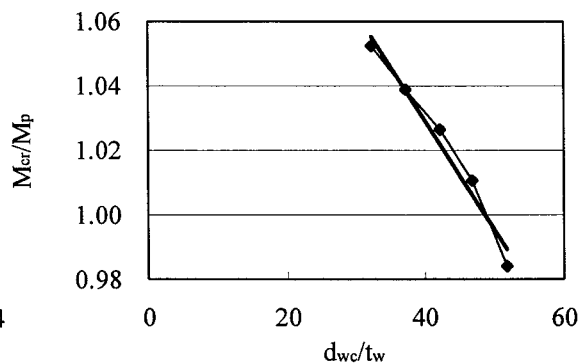


図 - 18 曲げ耐力とウェブの幅厚比の関係 (SM570)

式(8)を断面の曲げ耐力が全塑性モーメントに到達するための条件式として提案する。

$$\frac{d_{wc}}{t_w} \leq 2.0 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad (8)$$

本提案式は、AASHTO LRFDの規定(式(4))よりも若干緩和された条件となっている。

4. まとめ

本研究から次のような結論が得られた。

- (1) 今回対象とした断面においては、曲げ耐力に対する初期不整の影響はそれほど大きくない。
- (2) ウェブが座屈すると若干強度が低下したり、強度の上昇率が鈍化したりするが、その後斜張力場を形成し徐々に強度は増加する。
- (3) 曲げ耐力は全塑性状態におけるウェブ圧縮領域の幅厚比の増加に伴い、ほぼ線形的に減少する。
- (4) SS400, SM490, SM570の平均的な特性を用いた場合、ウェブ圧縮領域の限界幅厚比はそれぞれ59.5, 55.3, 48.2である。
- (5) 断面の曲げ耐力として全塑性モーメントを期待できるウェブ幅厚比の条件を定式化した。

本研究では、1.でも述べたように断面の曲げ耐力として全塑性モーメントを期待できる条件の確立を目指し、その第一段階として種々の鋼材に対するウェブの限界幅厚比を明らかにすることを目的とした検討を実施した。しかし、断面が全塑性状態に到達するためには、それ以前に横倒れ座屈が生じないことが必要である。また、負曲げ領域においては圧縮フランジが床版で固定されていないため、局部座屈を生じる可能性がある。今後こ

これらの点に関して検討を行い、断面の曲げ耐力として全塑性モーメントを期待できる条件を明らかにする予定である。

謝辞

本研究は、(社)日本鉄鋼連盟の委託により(社)日本鋼構造協会に設置された鋼橋性能向上研究委員会 合理化設計法部会(部会長：長井正嗣 長岡技術科学大学教授)の活動の一環として実施したものであり、部会の委員各位には貴重なご意見をいただいた。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，平成 14 年 3 月
- 2) AASHTO：LRFD Bridge Design Specifications, 1998.
- 3) Eurocode 3：Design of steel structures - Part 2: Steel bridges (ENV 1993-2)
- 4) Canadian Standards Association：Canadian Highway Bridge Design Code, 2000.
- 5) 工藤純一：高性能鋼と橋梁への適用，第 2 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，pp.27-38, 1999.8.
- 6) 神應昌嗣，野阪克義，鈴木正典，上平哲，伊藤満：モーメント勾配をうける低降伏比鋼 H 形断面ばりのモーメント - 塑性回転能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.50A, pp.113-119, 2004.3.
- 7) 鈴木敏郎，小河利行，五十嵐規矩夫，小幡学：降伏比の異なる鋼材を用いた高張力鋼梁の塑性変形性能に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 467 号，pp.169-176, 1995.10.
- 8) 鈴木敏郎，小河利行，五十嵐規矩夫，小幡学：フランジ幅圧比の小さな高張力鋼梁の塑性変形性能に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 467 号，pp.115-123, 1996
- 9) 江頭克礎，中村聖三，高橋和雄，呉慶雄：鋼 - コンクリート合成断面の正曲げ耐力に及ぼす鋼材特性の影響，構造工学論文集，Vol.49A, pp.113-119, 2003.3.
- 10) MARC Analysis Research Corporation：MARC User Manual Volume A- Volume E, version K7, August 1997.
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書，pp.23-25, 1996
- 12) 土木学会鋼構造委員会 鋼構造新技術小委員会：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術，1996